

論文 エネルギー吸収能力を有する RC 造 2 次壁の実験的研究

田口 孝*¹・田才 晃*²・川勝 康志郎*³・伴 幸雄*⁴

要旨: 近年, 地震時のエネルギー吸収部材を建物内に組み込み, 地震時の応答を軽減する制震工法が注目され, 多くが実用化されている。本研究は, 通常非耐力壁として扱われる RC 造 2 次壁に注目し, 壁内に鋼板を X 型に配置することによりエネルギー吸収能力を持たせる工法に関する実験的研究である。2 次壁内に配置される鋼板の形状を実験パラメータとした実大構造実験を行い, その 2 次壁がエネルギー吸収能力を有することを確認するとともに, 理論的にその耐力, 剛性が評価できることを示し, より有効な形状を選定した。

キーワード: 制震工法, RC 造 2 次壁, 鋼板, 断面欠損, 実大構造実験

1. はじめに

通常 RC 造 2 次壁は, 躯体と縁を切ることであり, 力が作用しない非耐力壁として重量のみが考慮されている。筆者らは図-1 に示すように, スリットによって躯体と縁を切った RC 造 2 次壁内にコンクリートとの付着を絶縁した鋼板を X 型に配置することにより, RC 造 2 次壁が損傷無し状態で, 鋼板に作用する軸応力によって振動エネルギーを吸収できる工法を提案し^{1), 2)}, 大地震時の構造物の変形制御に対し, 有効に作用することを確認している^{1), 3)}。

しかし, 既往の実験^{1), 2)} では試験体の躯体部を S 造としたため接合部の滑りが発生し, また, 使用した鋼材も SS400 と市場流通の少ない極低降伏点鋼の 2 種を使用していた。

そこで本研究では, 提案した工法である RC 造 2 次壁に水平力が作用した際, この壁がどのような性状や復元力特性を有するかを, より正確に把握し詳細なデータを収集するために, 躯体部も RC 造でモデル化し, 鋼板は SS400 のみを用いた実大構造実験によって確認するものである。さらに, 鋼板の形状を変化させることに

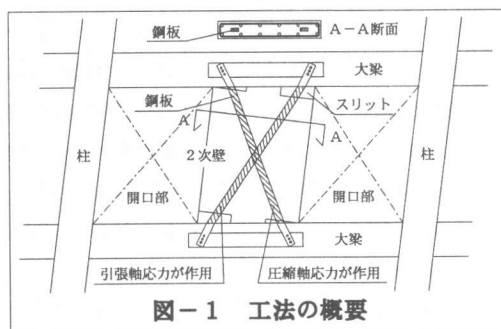


図-1 工法の概要

より, 力学的に明確であり, より有効に作用する形状を選定するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は実物大とし, 形状および寸法を図-2 に示す。ただし, 梁せいは加力装置の能力を考慮して約 2/3 の大きさとした。試験体壁部の高さ H や幅 W は, 本 RC 造 2 次壁の設置場所をマンション建物等のバルコニー側開口部間や玄関脇に想定して決定した。また, スリットの厚さは層間変形角 R が 1/30 まで達しても壁の回転を拘束しないように設定した。

* 1 : 矢作建設工業(株)建築技術部主任 工修 (正会員)

* 2 : 横浜国立大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

* 3 : 大阪工業大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

* 4 : 矢作建設工業(株)建築技術部係長 (正会員)

壁部の配筋は複配筋とし、中央部の縦筋(以下、上下梁接続筋と呼ぶ)は、2次壁の倒壊を防止する目的も踏まえて梁内へ定着した。壁部にX型に配置する鋼板(以下、壁部鋼板と呼ぶ)の端部には、コンクリートの割裂を防止する目的で1/4Hの区間にスパイラル筋を配した。

試験体は、梁部に配した壁部鋼板の固定用鋼板を用いて加力装置へ設置するものとした。

実験パラメータは、壁部鋼板の形状で設定し、表-1、図-2に示す3種類とした。SD-11は鋼板に断面欠損の無いもの、SD-21、SD-22は一枚の鋼板に2箇所断面欠損を有し、スリットから断面欠損までの距離が異なるものとした。使用する鋼材はSS400とし、断面欠損部はレーザー切断によって半円と直線を組み合わせた長円とした。その直線部分の長さは、Rが1/100まで達したとしても歪硬化の領域まで達しないよう考慮し、150mm×2箇所とした。また、壁部鋼板にはコンクリートと絶縁するために、壁内全面にグリースを塗布した。

試験体に使用した鋼材、コンクリートの特性を表-2、表-3に示す。

表-1 実験パラメータ

試験体	鋼板幅 (mm)	鋼板厚 (mm)	欠損長 (mm)	欠損幅 (mm)	欠損位置 (mm)*
SD-11	90.0	12.1	-	-	-
SD-21	90.0	12.1	150	45.1	150
SD-22	90.1	12.0	150	45.1	300

*: スリットから断面欠損部中央までの距離

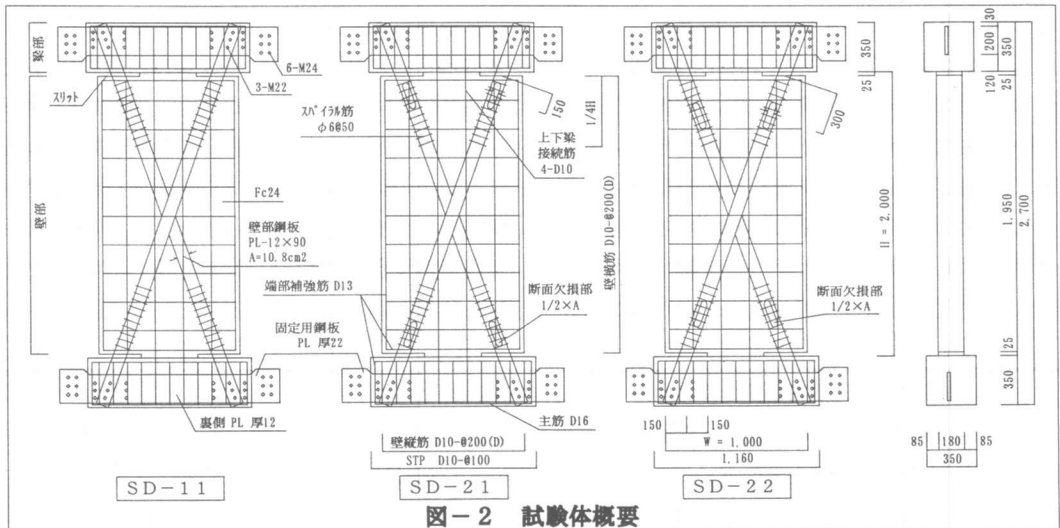


図-2 試験体概要

2.2 加力概要および計測概要

実験の加力概要を図-3に示す。本試験体は、ラーメンの柱・梁に囲まれた架構内に設置されることを想定しているため、パンタグラフを設置し、L型加力梁を水平に保ち、かつ試験体の面外変形を防ぐようにした。また、設置時に加力装置の重量が試験体に作用しないように軸力用油圧ジャッキを固定し、試験体中央部が反曲点となるよう逆対称正負交番繰返し加力とした。制御はRによって行い、その荷重履歴を表-4に示す。

測定は、高感度変位計を用いて水平変形量、試験体の傾き量、面外変形量等を測定し、歪ゲージにて壁部鋼板、固定用鋼板、壁内の鉄筋の要所を計測した。また、目視により随時状況を確認し、ひび割れ等を記録した。

表-2 鋼材の材料特性

材料	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)
SS400	279.0	440.7	48.2
D10(SD295A)	381.9	550.8	19.3
D13(SD295A)	360.3	524.1	19.9

表-3 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	粗骨材最大寸法 (mm)
40.4	2.7	18.5	20

表-4 載荷履歴

サイクル	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
層間変形角	1/800	1/400	1/200	1/100	1/67	1/200	1/50	1/30							
R (rad)	0.00125	0.0025	0.005	0.01	0.015	0.005	0.02	0.03							
層間変形量 (mm)	2.5	5.0	10.0	20.0	30.0	10.0	40.0	66.7							

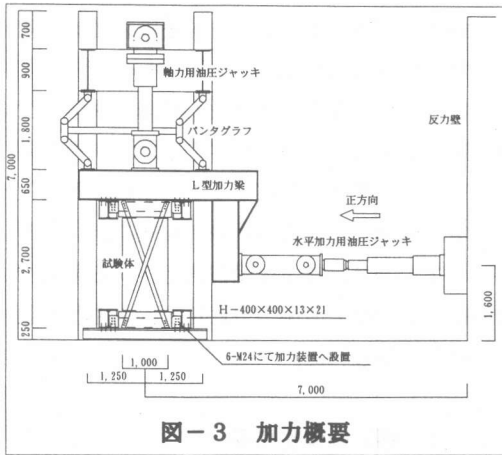


図-3 加力概要

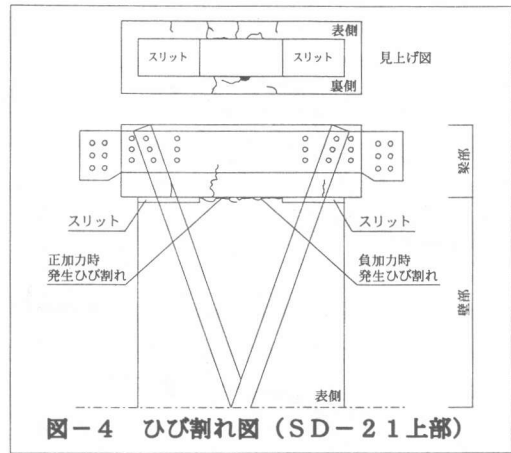


図-4 ひび割れ図 (SD-21 上部)

3. 実験結果

3.1 試験体のひび割れ

SD-21のひび割れ状況を図-4に示す。全試験体とも全体的に損傷はほとんど無く、左右のスリット間にのみ、顕著なひび割れが発生した。なお、試験体全体の傾きはこの部分のひび割れが開閉することによって行われ、最大ひび割れ幅は、Rが+1/30時に8~10mm程度であった。また、梁部にも微少なひび割れが発生したが、大変形時でも幅0.15mm程度であり復元力特性への影響が大きいものではなかった。本工法の実用段階では、スリット間に発生するひび割れは、ひび割れ誘発目地を設けることにより、一箇所に集約できるものと考えられる。

3.2 復元力特性

各試験体の復元力特性を図-5に示す。図中のA(上下梁接続筋)、B(スリット部鋼板)、C(B、D部以外の壁部鋼板)、D(断面欠損部鋼板)の記号は、図-5下図に示した位置の鉄筋や鋼板が最初に降伏した点を示している。

SD-11は最初にA部が引張降伏し、その後、ほぼ同時にB部、C部、梁側の鋼板が、引張側、圧縮側ともにそれぞれ降伏した。

SD-21は最初にA部が引張降伏し、その後、D部が引張側、圧縮側ともにそれぞれ降伏した。B部は大変形時に一部が圧縮降伏したが、D部より壁の内側のC部や梁側の鋼板は大変形

時でも弾性的挙動を示していた。

SD-22は最初にA部が引張降伏し、その後D部が引張降伏した。さらに変形が増加するとともにB部、C部(B部とD部の間)の順に引張降伏または圧縮降伏が発生した。D部より壁の内側のC部や梁側の鋼板は、大変形時でも弾性的挙動を示していた。

横筋や上下梁接続筋以外の縦筋には、ほとんど歪は発生していなかった。

全試験体とも、鋼板の一部が降伏すると剛性が低下する傾向が見られた。このため、鋼板降伏後の小変形11・12サイクル(R=1/200)に関しては、処女載荷時の5・6サイクル(R=1/200)の復元力特性とは異なる結果となった。また、軸力用油圧ジャッキは設置時に加力装置の重量が試験体に作用しないように固定していたため、加力により試験体が大きく傾くに連れて、加力装置の質量(約9ton)が圧縮軸力として試験体へ作用した。

3.3 鋼板の軸歪分布

各試験体の鋼板に作用している軸歪分布を図-6に示す。ここでは、全試験体とも鋼板が降伏していない弾性領域である3サイクル(R=+1/400)正方向最大変位時を示す。

SD-11では、引張歪は鋼板の梁側から壁部まで、ほぼ様な歪分布をしており、圧縮歪は壁の内側へ向かうにつれて歪が小さくなる結

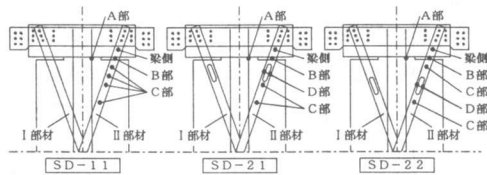
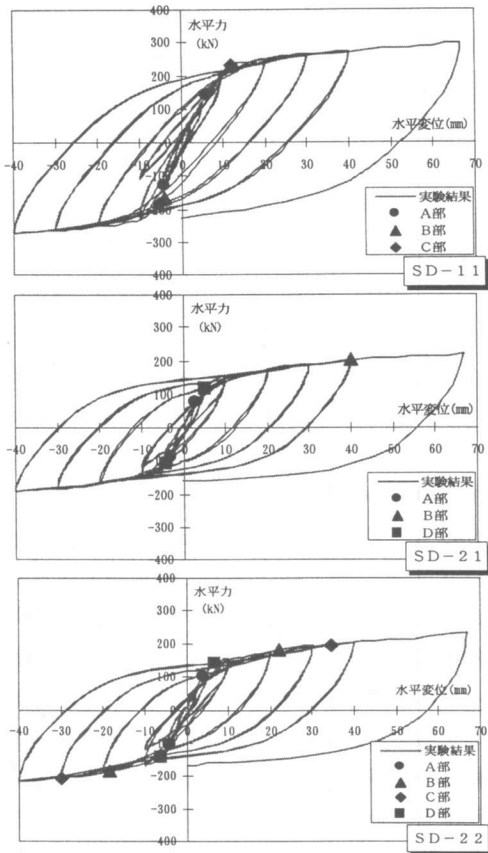


図-5 復元力特性

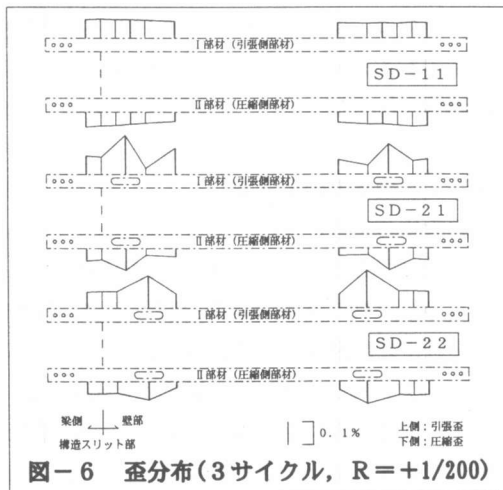


図-6 歪分布(3サイクル, R = +1/200)

果を得た。また、引張歪の方が圧縮歪に比べて大きな歪を生じていた。

SD-21, SD-22とも断面積が半分である断面欠損部で欠損部以外の約2倍の歪が発生していた。また、SD-11と同様に引張歪の方が圧縮歪より大きい現象が得られた。なお、SD-21では、断面欠損部に近接する位置で、その位置より壁の内側の歪に比べ、小さな歪となる結果が得られた。

3.4 鋼板の降伏状況

各試験体の各サイクル最大変位時における鋼板の降伏状況を図-7に示す。ここで図中の記号は図-5下図に従っている。

SD-11は、7.8サイクルで鋼板の全ての位置が降伏していた。SD-21は、5サイクルでD部は降伏したが、他の位置は降伏せず、14サイクルで一部のB部が降伏していた。SD-22は、5サイクルでD部が降伏し、以降B部、C部の順に降伏する結果となった。

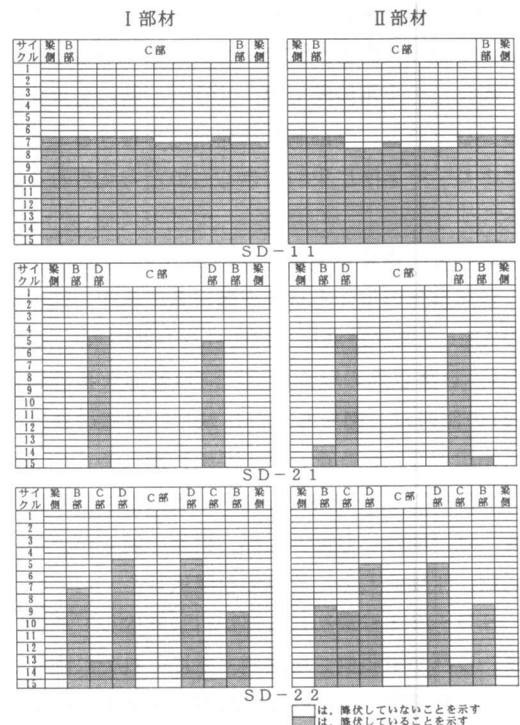


図-7 鋼板の降伏状況

4. 考察

4.1 降伏耐力と剛性

各試験体の降伏耐力，剛性は，RC造2次壁を図-8に示すような，水平力が鋼材にのみ作用するモデル化を行い算出する。

水平力Qと一枚の鋼板に作用する軸力pには式(1)の関係がある。

$$Q = 2pW/L \quad (1)$$

RC造2次壁の降伏耐力 Q_y は鋼板の降伏軸力 p_y により決定されるとし，式(2)により計算される。ただし，鋼板に断面欠損を有する試験体では，AをA'と置き換える。

$$Q_y = \frac{2p_y W}{L} = \frac{2A\sigma_y W}{\sqrt{H^2 + W^2}} \quad (2)$$

次に鋼板の変形量 ΔL は式(3)で計算される。

$$\Delta L = |L' - L| \quad (3)$$

$$L' = \sqrt{H^2 + (W + \delta)^2}$$

断面欠損の無い鋼板の軸剛性kは式(4)で計算され，

$$p = \frac{AE_s}{L} \Delta L = k \Delta L \quad (4)$$

断面欠損のある鋼板の軸剛性kは式(5)で計算される。

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{p}{E_s} \left(\frac{L_1}{A} + \frac{L_2}{A'} \right)$$

$$p = \frac{E_s}{\left(\frac{L_1}{A} + \frac{L_2}{A'} \right)} \Delta L = k \Delta L \quad (5)$$

以上の式をまとめると，式(6)が導かれる。

$$Q = \frac{2W}{L} k \cdot \left| \sqrt{H^2 + (W + \delta)^2} - \sqrt{H^2 + W^2} \right| \quad (6)$$

式(6)を水平変位 δ で微分し， $\delta = 0$ を代入すると，式(7)により初期勾配Kが計算される。

$$K = \frac{2W^2}{L^2} k \quad (7)$$

式(2)，式(7)によって計算された値および実験値を表-5，表-6に示す。ここで実験値の耐力は，鋼板のある位置が最初に降伏した荷重を示し，実験値の剛性は1~4サイクルに

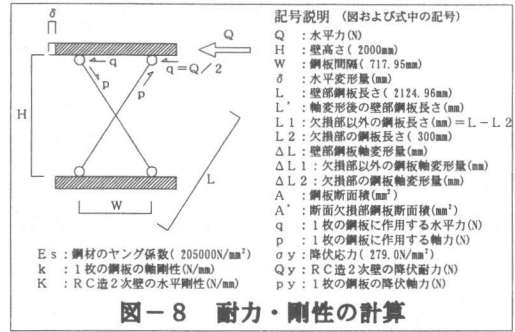


図-8 耐力・剛性の計算

おける復元力特性の正方向・負方向の最大変位値を結んだ直線の傾きである。

以上の結果，試験体の降伏耐力はSD-11，SD-21およびSD-22のB，C部に関しては，比較的正しく実験値を表すことができた。しかし，SD-22のD部に関しては，実験値は計算値に比べ1.4倍程度高い値となった。これは，図-5，図-7，表-5に見られるようにSD-22はSD-21に比べD部降伏後にもB部やC部が降伏する現象が発生した。すなわち，鋼板に発生するはずの軸力が全てD部まで伝達されず，この部分の降伏だけで処理できていないために，実験値の方が計算値より高くなったと考察される。

表-5 試験体降伏耐力

試験体	A, A' (mm ²)	加力方向	位置	実験値Q _y (kN)	計算値Q _y (kN)	実験値/計算値
SD-11	1087.3	正方向	B部	232.50	204.98	1.13
		負方向	B部	-166.77		0.81
		正方向	C部	232.50		1.13
		負方向	C部	-182.47		0.89
SD-21	1085.5	正方向	B部	201.11	204.64	0.98
		負方向	B部	-		-
		正方向	C部	-		-
		負方向	C部	-		-
SD-22	1081.3	正方向	D部	117.72	101.91	1.16
		負方向	D部	-109.87		1.08
		正方向	B部	181.49		0.89
		負方向	B部	-184.43		0.90
SD-22	539.7	正方向	C部	196.20	101.74	0.96
		負方向	C部	-206.99		1.02
		正方向	D部	141.26		1.39
		負方向	D部	-141.26		1.39

表-6 試験体剛性

試験体	層間変形角R	サイクル	実験値K (kN/mm)	計算値K (kN/mm)	実験値/計算値
SD-11	1/800	1	33.42	23.95	1.39
		2	32.37		1.35
	1/400	3	26.88		1.12
		4	26.38		1.10
SD-21	1/800	1	28.64	20.93	1.36
		2	27.39		1.30
	1/400	3	23.38		1.11
		4	22.70		1.08
SD-22	1/800	1	29.06	20.86	1.39
		2	27.89		1.33
	1/400	3	23.47		1.12
		4	22.96		1.10

次に試験体の剛性に関しては、全ての試験体とも 1・2 サイクル($R=1/800$)では、実験結果の方が 1.3~1.4 倍程度大きな値となったが、鉄筋が降伏し始める 3・4 ステップ($R=1/400$)では、ほぼ等しい結果となった。

以上の結果、図-8 のモデル化による考え方によって理論的に試験体の耐力・剛性ともに評価できることが確認された。

4.2 エネルギー吸収能力

実験で得られた各試験体のエネルギー吸収量 E および等価粘性減衰定数 h_{eq} を図-9 に示す。 E は SD-11 が他に比べ大きな値を示しているが、 h_{eq} は SD-21, SD-22 の方が大きな値を示した。また、SD-21, SD-22 においては、 E , h_{eq} ともほぼ同様な結果となった。全ての試験体に損傷がほとんどなかったため、大変形後の小変形 11・12 サイクル($R=1/200$)においても処女載荷時の 5・6 サイクル($R=1/200$)とほぼ同様な値を示した。これより、地震時のように不規則な変形が発生する場合においても、安定したエネルギー吸収能力を有すると考察される。また、SD-21, SD-22 に関しては、 R が 1/200 程度の範囲から h_{eq} が比較的大きな値を示し、建物の揺れに対し有効に作用する可能性が確認された。

4.3 有効な形状の選定

以上の考察より、構造的に明確であり、地震時の建物の揺れに対し有効に作用するであろう形状の試験体は SD-21 と考えられる。

理由としては、SD-11 は耐力・剛性は理論的に評価できるが、鋼板に一樣な軸応力が発生するため降伏する位置が特定できず、そのためにボルト穴の断面欠損を有する梁内の接合部で破壊する可能性があること、SD-22 は小さな変形時から比較的大きな h_{eq} を示すが、鋼板の断面欠損の位置が壁の内側にあるため、他の位置でも鋼板が降伏する可能性があることが挙げられる。したがって、降伏する位置が特定

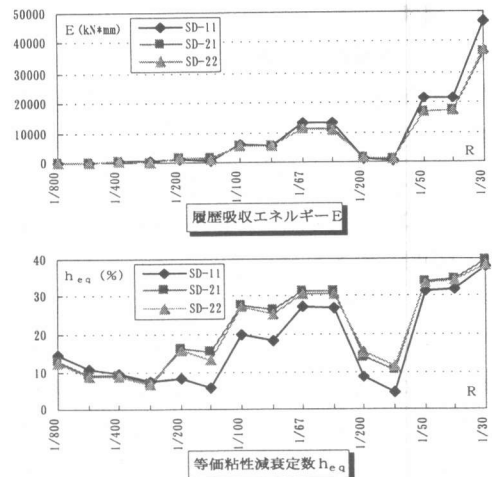


図-9 エネルギー吸収能力

可能で、理論的に耐力・剛性が評価可能であり、且つ比較的小さな変形時から建物の揺れの制御に有効に作用するであろう SD-21 の形状、すなわち鋼板に断面欠損を有し、その位置がスリットから近い位置に存在する形状が本工法の目的に対し、有効な形状であると選定される。

5. まとめ

本研究では、RC造2次壁内に鋼板をX型に配置することによってエネルギー吸収能力を持たせることを目的とした工法に関して実験的に研究を行った。鋼板の形状を実験パラメータとした構造実験によって、その2次壁がエネルギー吸収能力を有することを確認し、大変形後も2次壁が損傷しないという利点が得られた。さらに、理論的にその耐力、剛性が評価できることを示し、より有効な鋼材の形状を選定した。

参考文献

- 1) 田口孝ほか：RC造2次壁に制震効果を与える新しい構造方式、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 21, No. 1, 1999. 7
- 2) 川勝康志郎ほか：RC造2次壁に制震効果を与える構造方式(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol. B2, pp. 955-956, 1999. 9
- 3) 田口孝ほか：RC造2次壁に制震効果を与える構造方式(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol. B2, pp. 957-958, 1999. 9

謝辞

今回の実験にあたり、多大な協力を頂きました大阪工業大学の学生諸氏に謝意を表します。